



**Ministério da Educação**  
**Universidade Federal da Integração Latino-Americana**  
**Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território**  
Centro Interdisciplinar de Tecnologia e Infraestrutura  
Engenharia Civil de Infraestrutura

## **ANÁLISE COMPARATIVA DE DIMENSIONAMENTO DE LAJES MACIÇAS DE CONCRETO ARMADO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO**

MATHEUS DAVIES ANSBACH

Foz do Iguaçu, PR

Julho de 2025



**Ministério da Educação**  
**Universidade Federal da Integração Latino-Americana**  
**Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território**  
Centro Interdisciplinar de Tecnologia e Infraestrutura  
Engenharia Civil de Infraestrutura

## **ANÁLISE COMPARATIVA DE DIMENSIONAMENTO DE LAJES MACIÇAS DE CONCRETO ARMADO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO**

**MATHEUS DAVIES ANSBACH**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Banca Examinadora do Curso de Engenharia Civil de Infraestrutura da UNILA, como parte dos requisitos para obtenção do Grau de Bacharel em Engenharia Civil.

**Orientador:** Profº. Drº. André Jacomel Torii

Foz do Iguaçu, PR  
Julho de 2025

MATHEUS DAVIES ANSBACH

**ANÁLISE COMPARATIVA DE DIMENSIONAMENTO DE LAJES MACIÇAS DE CONCRETO  
ARMADO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Banca Examinadora do Curso de Engenharia Civil de Infraestrutura da UNILA, como parte dos requisitos para obtenção do Grau de Bacharel em Engenharia Civil.

1. BANCA EXAMINADORA

---

Orientador: Profº. Drº. André Jacomel Torii  
UNILA

---

Profº. Drº. Aref Kalilo Lima Kzam  
UNILA

---

Profº. Drº. Ulises Bobadilla Guadalupe  
UNILA

Foz do Iguaçu, 04 de agosto de 2025.

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus, por ter me concedido saúde, sabedoria e força para enfrentar cada etapa dessa jornada acadêmica.

Agradeço ao meu professor orientador, André Torii, não só pela constante orientação como também pelo apoio e incentivo ao longo dessa jornada.

Agradeço também aos professores membros da banca avaliadora pelas valiosas contribuições, sugestões e considerações, que foram fundamentais para o aprimoramento deste trabalho.

Aos colegas de curso, pela parceria, pela troca de conhecimentos e pela convivência ao longo da graduação, que contribuíram para tornar essa caminhada mais enriquecedora.

Em especial, aos meus colegas Renato e Isaías, pelo incentivo constante, pelas noites de estudo compartilhadas e pela sincera amizade (7).

Agradeço ao meu pai, por ser meu exemplo de dedicação e perseverança, à minha mãe, que sempre me apoiou com amor e dedicação, e à minha irmã, pela inspiração de seu trabalho impecável, digno de mais que uma simples nota 10.

Ao amor da minha vida, Aline, agradeço pelo apoio incondicional e pela companhia ao longo de minha formação.

A todos que, de alguma forma, contribuíram direta ou indiretamente para a concretização deste projeto, o meu mais sincero agradecimento.

## RESUMO

O presente trabalho desenvolveu uma análise comparativa do dimensionamento de lajes maciças de concreto armado simplesmente apoiadas, sob condições normais e em situação de incêndio. O trabalho limitou-se a analisar o Estado Limite Último (ELU), não considerando o Estado Limite de Serviço (ELS). Para isso, empregou o método simplificado da NBR 15200 para diferentes Tempos Requeridos de Resistência ao Fogo (TRRF). Realizou-se, para o dimensionamento, uma simulação de Monte Carlo com 100.000 casos, utilizando parâmetros construtivos variáveis, com distribuição uniforme, como o vão, o carregamento permanente, o cobrimento e a resistência característica do concreto à compressão ( $f_{ck}$ ). Verificou-se que, em comparação ao dimensionamento em condições normais, o método simplificado, em média, não resultou em aumento na quantidade de armadura para TRRFs inferiores a 120 minutos. Em particular, para TRRFs de até 60 minutos, menos de 10% dos casos não atenderam à verificação. Observou-se que, entre os valores adotados, o cobrimento não reduz significativamente o uso de armadura para TRRFs até 60 minutos; que o  $f_{ck}$  não possui influência nos resultados; e que a carga permanente apresenta pequena significância. Para tempos de 30 e 60 minutos de exposição ao incêndio, casos críticos, que demandam maior armadura em situação de incêndio, ocorreram predominantemente em lajes com vãos pequenos, entre 2 e 3 metros. Concluiu-se que, para o tipo de laje analisada e dentro dos parâmetros utilizados, a verificação da resistência ao incêndio pode ser desnecessária para TRRFs inferiores a 60 minutos em lajes com vãos superiores a 3 metros.

**Palavras-chave:** Dimensionamento; Lajes maciças; Incêndio; TRRF; ELU.

## ABSTRACT

The present study conducted a comparative analysis of the design of simply supported solid reinforced concrete slabs under normal conditions and fire situations. The study was limited to analyzing the Ultimate Limit State (ULS), without considering the Serviceability Limit State (SLS). For this purpose, the simplified method from NBR 15200 was employed for different Required Fire Resistance Times (FRR). A Monte Carlo simulation with 100,000 cases was performed for the design, using uniformly distributed variable construction parameters such as span, permanent load, concrete cover, and characteristic compressive strength of concrete ( $f_{ck}$ ). It was found that, compared to design under normal conditions, the simplified method, on average, did not result in an increase in the amount of reinforcement for FRRs below 120 minutes. In particular, for FRR up to 60 minutes, less than 10% of cases failed the verification. It was observed that, within the adopted value ranges, the concrete cover does not significantly reduce reinforcement requirements for FRR up to 60 minutes; that  $f_{ck}$  has no influence on the results; and that the permanent load has low significance. For 30 and 60 minute fire exposures, critical cases requiring more reinforcement under fire conditions predominantly occurred in slabs with small spans, between 2 and 3 meters. It was concluded that, for the type of slab analyzed and within the parameters used, fire resistance verification may be unnecessary for TRRFs below 60 minutes in slabs with spans greater than 3 meters.

**Keywords:** Design; Solid slabs; Fire; FRR; ULS.

---

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA</b>	<b>7</b>
1.1 Objetivo Geral	8
1.2 Objetivos Específicos	8
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO</b>	<b>9</b>
2.1 Incêndio	9
2.2 Modelos de Incêndio Padrão	9
2.3 Tempo Requerido de Resistência Ao Fogo – TRRF	10
2.4 Combinações Das Ações	11
2.5 Comportamento Do Concreto Em Situação De Incêndio	12
2.6 Comportamento Do Aço Em Situação De Incêndio	14
2.7 Métodos De Verificação Da Segurança	15
2.7.1 Método tabular para lajes	16
2.7.2 Método simplificado	16
2.8 Análise de Variáveis	17
<b>3 METODOLOGIA</b>	<b>18</b>
3.1 Geração de Casos Aleatórios	18
3.2 Dimensionamento	19
3.3 Análise Estatística	22
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>23</b>
4.1 Escolha do Método de Verificação	23
4.2 Aplicação do Método Simplificado no Dimensionamento	23
4.3 Análise dos Dados	24
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>39</b>
<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>41</b>

## 1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

Na realização de projetos de engenharia civil, deve-se sempre priorizar a segurança estrutural, visando garantir a proteção dos usuários, respeitando os estados limites exigidos (ABNT, 2023).

Para garantir a estabilidade de uma estrutura, é necessário que os elementos estruturais sejam dimensionados para resistir aos esforços atuantes, sem que haja alteração na configuração inicial da estrutura. Para isso, a NBR 6118 (ABNT, 2023) afirma que se deve considerar a atuação do peso próprio, além de cargas permanentes e variáveis. O presente trabalho deu enfoque na consideração da carga excepcional decorrente da exposição da estrutura a um incêndio utilizando a NBR 15200 (ABNT, 2024).

No Brasil, até 1975 não havia norma referente ao dimensionamento ou a exigências perante a segurança contra incêndios em edificações. Somente após as tragédias ocorridas nos edifícios Joelma e Andraus, em São Paulo, que houve a criação de uma regulamentação, com o objetivo de aumentar a resistência das edificações ao fogo (POLI-USP, 2024). Atualmente tem-se a NBR 15200 (ABNT, 2024) e a NBR 14432 (ABNT, 2001) que normatizam as medidas de segurança necessárias para a prevenção aos incêndios.

Segundo Hager (2013), com uma hora de exposição a temperaturas acima de 500°C, o concreto pode perder até 40% de sua resistência. De acordo com a ASTM E119 (ASTM, 2020), quando as armaduras de um elemento de concreto armado chegam a uma temperatura de 593°C ocorre a falha térmica do elemento.

Dada a importância da consideração do incêndio no cálculo estrutural, o projeto considerou o Tempo Requerido de Resistência ao Fogo (TRRF) (ABNT, 2024). O TRRF é o tempo que a estrutura deve manter-se em pé, garantindo que os usuários consigam evacuá-la antes de um possível colapso (ABNT, 2001).

O trabalho analisou a importância de se considerar a ação do incêndio no dimensionamento de lajes maciças de concreto armado apoiadas nos quatro lados. A análise foi feita em função do TRRF, comparando os resultados com o dimensionamento com base na combinação última normal. O Estado Limite de Serviço (ELS) não foi considerado no estudo.

Foram gerados casos aleatórios que buscaram representar a maioria dos casos usuais de lajes maciças, de forma que os resultados possuísem relevância estatística.

Com isso, foram analisados os casos que não passaram na verificação do método simplificado, em que o dimensionamento para a ação excepcional de incêndio exigiu maior uso de armadura.

### 1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral do presente trabalho foi a realização de uma análise comparativa do dimensionamento de lajes maciças de concreto armado apoiadas nos quatro lados, com e sem a ação do fogo.

### 1.2 Objetivos Específicos

- a) Criar rotinas de cálculos para o dimensionamento da laje maciça de concreto armado apoiada nos quatro bordos considerando o Estado Limite Último (ELU);
- b) Avaliar a variação do espaçamento das armaduras em função da utilização de valores distintos de TRRF, de vãos, de carregamentos, de cobrimentos da armadura e de resistências características do concreto à compressão a serem utilizadas na laje.
- c) Realizar simulações com casos aleatórios e comparar, do ponto de vista estatístico, a diferença de considerar o incêndio ou não no dimensionado das lajes em relação ao Estado Limite Último (ELU).

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Para dimensionar e analisar estruturas de concreto em situação de incêndio é necessário conhecer os fundamentos deste método construtivo, bem como entender a finalidade da estrutura, o que interfere diretamente nos carregamentos a serem considerados. Para isso, é importante elucidar os temas que foram abordados no presente trabalho.

### 2.1 Incêndio

O conceito de incêndio refere-se a uma combustão descontrolada, capaz de causar danos materiais, comprometer a integridade estrutural e resultar em perdas humanas (UNDRR, 2015). Incêndios em locais com materiais inflamáveis, como móveis em edificações com alta taxa de ocupação, tendem a se propagar de forma rápida e intensa. Por isso, é essencial considerar a resistência dos elementos estruturais, a fim de mitigar perdas humanas e reduzir o risco de colapso total ou parcial da estrutura (Ramachandran, 1999; UNDRR, 2015).

### 2.2 Modelos de Incêndio Padrão

Para a avaliação e compreensão do comportamento dos gases com a mudança da temperatura e sua evolução ao longo do tempo, utilizam-se curvas temperatura-tempo para representar o incêndio (Santiago Filho, 2018). Incêndios reais variam de acordo com o ambiente onde ocorrem, e sua representação e efeitos em estruturas são de considerável complexidade (Fanton, 2019). As normas apresentam meios de realizar a modelagem da temperatura através de curvas de incêndio nominais e paramétricas (Fanton, 2019). As curvas nominais são termos genéricos para qualificação de incêndios padronizados, definidas por expressões ou tabelas, que não dependem da dimensão e tipo da edificação (Fanton, 2019).

As curvas de incêndio-padrão mais conceituadas são a curva ASTM E-119, criada nos Estados Unidos, e a ISO 834, elaborada na Suíça (Britto, 2018). Essas curvas servem para avaliar de maneira aproximada o comportamento de um incêndio, relacionando temperaturas de gases com o tempo decorrido do incêndio

(Britto, 2018). A ABNT NBR 15200:2024 e a ABNT NBR 14432:2001 definem o incêndio-padrão como a elevação padronizada de temperatura em função do tempo. A Eq. (1) representa a temperatura do incêndio-padrão (ABNT, 2001; Araújo, 2014b):

$$T_{f(t)} = 345 * \log_{10}(8t + 1) + T_0 \quad (1)$$

Utilizando as temperaturas em graus celsius,  $T_f(t)$  representa a temperatura dos gases do incêndio em função do tempo decorrido,  $T_0$  é a temperatura inicial do ambiente antes do aquecimento e  $t$  é o tempo decorrido, em minutos.

Utilizando-se as Eqs. (2) e (3) referentes ao modelo de incêndio, pode-se obter a temperatura no interior de elementos de concreto (Araújo, 2014b; Costa; Figueiredo; Silva, 2002).

$$T = T_0 + [\alpha * T_{f(t)} - T_0] * \exp\left(\frac{-0,21y}{\sqrt{t}}\right) \quad (2)$$

$$\alpha = 0,73 + 0,048 \ln(t) \quad (3)$$

Tem-se  $T$  como a temperatura atingida no interior do concreto no ponto de análise,  $T_0$  temperatura inicial,  $T_f(t)$  a temperatura em função do tempo decorrido ( $t$ ) em minutos,  $y$  representando a distância da superfície exposta ao incêndio até o ponto de análise, em milímetros e  $\alpha$  referente ao coeficiente de absorção térmica em estruturas de concreto.

### 2.3 Tempo Requerido de Resistência Ao Fogo – TRRF

O Tempo Requerido de Resistência ao Fogo (TRRF) é um parâmetro exigido no dimensionamento de estruturas, influenciando, no caso de lajes de concreto armado, o cobrimento mínimo das armaduras (ABNT, 2023).

O TRRF representa o tempo de resistência mínima que partes da estrutura devem resistir ao fogo mantendo a integridade estrutural,

compartimentando diferentes setores e controlando a evolução do incêndio, permitindo a evacuação dos usuários da estrutura (ABNT, 2024; ABNT, 2001).

Para a determinação do TRRF é possível consultar a NBR 14432 (ABNT, 2001). O tempo dado por esse parâmetro, em minutos, varia em função da altura do edifício, do tipo de ocupação, do tipo de elemento estrutural, do método construtivo utilizado e em função da profundidade do subsolo (ABNT, 2001), pois estas características afetam o tempo de evacuação da construção. Comumente obterá valores requeridos de resistência de 30 a 120 minutos, sendo meia hora o tempo mínimo a ser considerado (ABNT, 2024).

## 2.4 Combinações Das Ações

Ao analisar as cargas que atuam sobre uma estrutura é possível classificá-las em permanentes, que atuam constantemente na estrutura, variáveis, referente ao uso e ocupação, ou acidentais, que ocorrem em eventos incomuns como o caso de impactos, sismos ou incêndios (ABNT, 2023).

As combinações são divididas pela NBR 6118 (ABNT, 2023) em combinações últimas e de serviço. O estado limite último (ELU) diz respeito ao colapso, já o estado limite de serviço (ELS) refere-se a usabilidade, utilizada para análise de flecha, fissuração e vibração (Araújo, 2014a). Assim, combinações referentes ao ELU requerem maior segurança que aquelas referentes ao ELS.

Para o estado limite último se tem a solicitação da estrutura dada pelas cargas multiplicadas por coeficientes majoradores (ABNT, 2023). Referente ao estado limite de serviço não há a majoração da carga, verificando o comportamento em condições ordinárias (Araújo, 2014a).

A combinação última pode ser dividida em normal, especial ou de construção e excepcional (ABNT, 2023). A combinação excepcional é referente a explosões, choques, incêndios ou sismos, sendo possível considerar o incêndio através de minoração da resistência dos materiais estruturais (ABNT, 2003). Essa combinação pode ser calculada através da Eq. (4), na qual  $F_d$  representa a solicitação de cálculo para análise em situação de incêndio (ABNT, 2023).  $F_{gk}$  são as ações permanentes características (ABNT, 2023).  $F_{qk}$  são as ações variáveis (ABNT, 2023).  $\gamma_g$  e  $\gamma_q$  são os coeficiente de ponderação para ações permanentes e

variáveis, respectivamente (ABNT, 2023).  $\psi_2$  é o fator de redução para ações excepcionais (ABNT, 2023).

$$f_d = \gamma_g F_{gk} + \gamma_q \psi_2 f_{qk} \quad (4)$$

O valor de cada coeficiente para o caso de uma análise de incêndio são:  $\gamma_g = 1,2$ ,  $\gamma_q = 1,0$  e  $\psi_2 = 0,4$  (ABNT, 2023), diferentemente da combinação normal da NBR 6118, que prevê a majoração de ambos os carregamentos por 1,4 (ABNT, 2023).

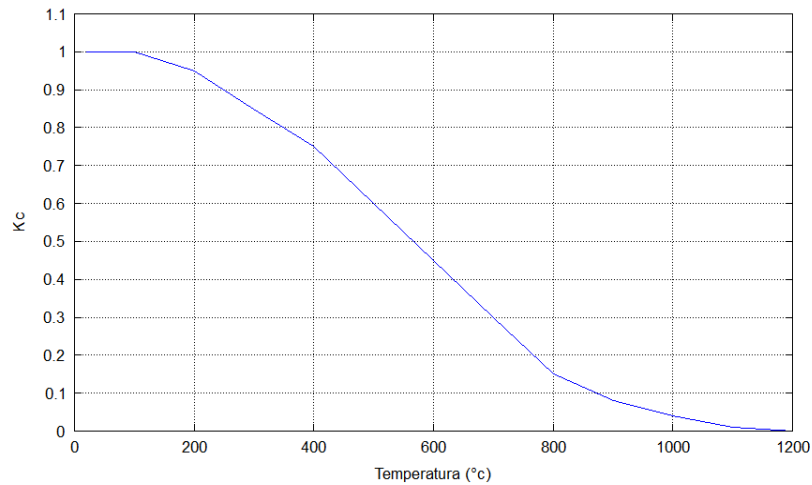
## 2.5 Comportamento Do Concreto Em Situação De Incêndio

Em situações de incêndio, propriedades físicas, químicas e mecânicas do concreto sofrem alterações significativas (Fanton, 2019). A estrutura de concreto armado, quando submetida ao fogo, tem sua resistência mecânica reduzida (Fanton, 2019). A elevação da temperatura acima de 100 °C provoca a degeneração das propriedades mecânicas do concreto, resultando na diminuição de sua capacidade resistente (Santiago Filho, 2018). A redução da resistência à compressão do concreto em situação de incêndio pode ser representada pela Eq. (5) (ABNT, 2024):

$$f_{c,\theta} = k_{c,\theta} f_{ck} \quad (5)$$

Onde  $f_{c,\theta}$  é a resistência à compressão do concreto na temperatura  $\theta$ ,  $k_{c,\theta}$  é o fator de redução da resistência que depende da temperatura  $\theta$ , e  $f_{ck}$  é a resistência característica à compressão do concreto à temperatura ambiente (MPa) (Zago;Lopes, 2017). Para a obtenção do valor de  $k_{c,\theta}$ , utiliza-se o gráfico representado na figura 1 feito a partir dos valores da tabela 1.

**Figura 1** - Comportamento da resistência do concreto com a variação da temperatura em graus celsius para agregados graúdos silicosos.



Fonte: Adaptado NBR 15200 (ABNT, 2024).

**Tabela 1** - Razões da resistência característica e do módulo de elasticidade do concreto perante o aumento da temperatura para concretos de massa específica normal (2000 a 2800 Kg/m³) preparados predominantemente com agregados silicosos e calcáreos.

Temperatura do concreto, $\theta$ °C	Agregado silicoso		Agregado calcáreo	
	$f_{c0}/f_{ck}$	$E_{c0}/E_c$	$f_{c,0}/f_{ck}$	$E_{c,0}/E_c$
1	2	3	4	5
20	1,00	1,00	1,00	1,00
100	1,00	1,00	1,00	1,00
200	0,95	0,90	0,97	0,94
300	0,85	0,72	0,91	0,83
400	0,75	0,56	0,85	0,72
500	0,60	0,36	0,74	0,55
600	0,45	0,20	0,60	0,36
700	0,30	0,09	0,43	0,19
800	0,15	0,02	0,27	0,07
900	0,08	0,01	0,15	0,02
1000	0,04	0,00	0,06	0,00
1100	0,01	0,00	0,02	0,00
1200	0,00	0,00	0,00	0,00

Fonte: Dados apresentados pela NBR 15200 (ABNT, 2024).

## 2.6 Comportamento Do Aço Em Situação De Incêndio

Em situação de incêndio, a resistência mecânica do aço é reduzida (Britto, 2018; ABNT, 2024).

A Associação Brasileira de Normas Técnicas estabelece que a redução da resistência ao escoamento do aço da armadura passiva é dada pela Eq. (6) (ABNT, 2024):

$$f_{y,\theta} = k_{s,\theta} f_{yk} \quad (6)$$

Onde  $f_{y,\theta}$  é a resistência ao escoamento do aço na temperatura  $\theta$ ,  $k_{s,\theta}$  é o fator de redução da resistência do aço que depende da temperatura  $\theta$ , conforme tabela 2, e  $f_{yk}$  é a resistência característica ao escoamento do aço à temperatura ambiente (MPa) (ABNT, 2024; Zago;Lopes, 2017).

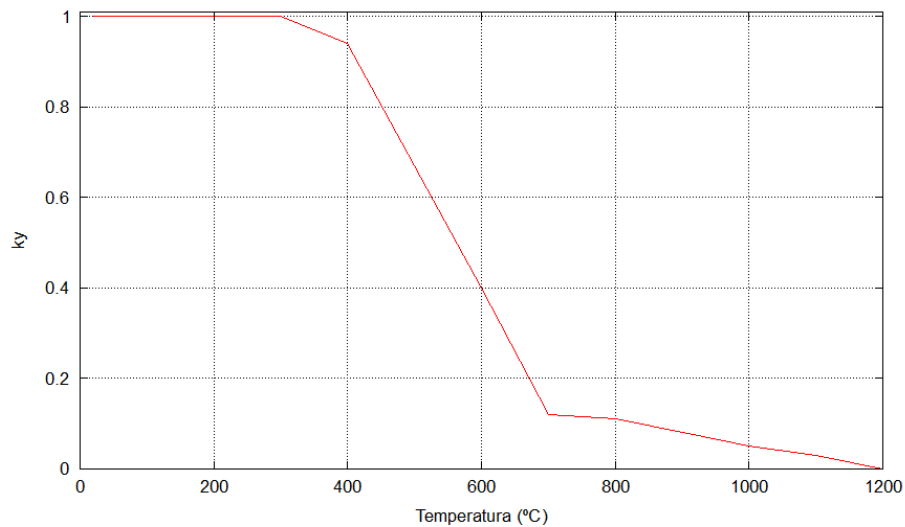
**Tabela 2** - Razões da resistência característica e do módulo de elasticidade do aço perante o aumento da temperatura para os aços CA-50 e CA-60.

Temperatura do aço, $\theta$ °C	$f_{y,\theta}/f_{yk}$			$E_{s,\theta}/E_s$	
	Tração		Compressão	CA-50	CA-60
	CA-50	CA-60	CA-50 ou CA-60		
1	2	3	4	5	6
20	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
100	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
200	1,00	1,00	0,89	0,90	0,87
300	1,00	1,00	0,78	0,80	0,72
400	1,00	0,94	0,67	0,70	0,56
500	0,78	0,67	0,56	0,60	0,40
600	0,47	0,40	0,33	0,31	0,24
700	0,23	0,12	0,10	0,13	0,08
800	0,11	0,11	0,08	0,09	0,06
900	0,06	0,08	0,06	0,07	0,05
1000	0,04	0,05	0,04	0,04	0,03
1100	0,02	0,03	0,02	0,02	0,02
1200	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

**Fonte:** Dados apresentados pela NBR 15200 (ABNT, 2024).

A partir dos dados da tabela 2 foi possível plotar um gráfico da resistência à tração do aço CA-60 pela temperatura.

**Figura 2** - Comportamento da resistência do aço à tração com a variação da temperatura em graus celsius para CA-60.



Fonte: Adaptado NBR 15200 (ABNT, 2024).

A resistência ao escoamento do aço cai bruscamente acima de 400°C (Santiago Filho, 2018). Percebe-se que quando a temperatura atinge 600°C a tensão de escoamento é reduzida para 40% de seu valor original.

## 2.7 Métodos De Verificação Da Segurança

A NBR 15200 (ABNT, 2024) permite que a verificação da segurança ao fogo seja feita de quatro maneiras. A primeira é o método simplificado, no qual se realiza o dimensionamento para resistir à situação de incêndio. A segunda é o método tabular, no qual deve-se verificar se a laje atende os parâmetros mínimos tabelados. A terceira é a análise da resistência por ensaios laboratoriais. Permitido, por último, o uso de outros métodos gerais de cálculo desde que devidamente justificados.

### 2.7.1 Método tabular para lajes

O método tabular é apresentado pela NBR 15200 (ABNT, 2024) como uma maneira de verificar se um determinado elemento estrutural está de acordo com as exigências de resistência dadas pelos seus respectivos TRRF.

Esse método se dá pela utilização de tabelas normalizadas, variando em função da condição de apoio, tipo de elemento estrutural e direção em que a estrutura é armada. Para o caso de lajes maciças de concreto armado, é indicando o cobrimento mínimo de armaduras em relação a lado exposto à ação do fogo e a espessura mínima a ser atendida, para garantir uma função corta-fogo, como apresentado na tabela 3 (ABNT, 2024).

**Tabela 3** - Dimensões mínimas para lajes lisas ou cogumelo.

TRRF (min)	h (mm)	c1 (mm)
30	150	10
60	180	15
90	200	25
120	200	35

**Fonte:** Dados apresentados pela NBR 15200 (ABNT, 2024).

O método tabular apresenta claras vantagens e desvantagens. Perante as vantagens pode-se afirmar que é uma ferramenta simples e rápida de se utilizar, apresentando resultados de maneira mais conservadora e confiável, atendendo os requisitos de segurança, sendo amplamente utilizado em projetos de dimensionamento (ABNT, 2024). Levando em consideração as desvantagens, por ser um método tabelado, as dimensões adotadas serão maiores do que as exigidas por outros métodos. (ABNT, 2024).

### 2.7.2 Método simplificado

A NBR 15200 (ABNT, 2024) apresenta o método simplificado, o qual verifica a resistência à situação de incêndio, com tempo definido pelo TRRF, pelo dimensionamento da armadura considerando a sobrecarga de incêndio no cálculo.

O método simplificado utiliza fórmulas para calcular a resistência da estrutura em função da distribuição temperatura no elemento analisado (ABNT, 2024). Ao utilizar esse método permite-se a consideração, pela NBR 15200, da hipótese que as solicitações de incêndio são equivalentes a 70% das solicitações de combinação normal (ABNT, 2024).

## 2.8 Análise de Variáveis

Para analisar o comportamento de variáveis deve-se entender os tipos de dados a serem correlacionados, possibilitando a escolha correta do tipo de correlação.

Para análise quantitativas de dados paramétricos é possível utilizar o coeficiente de correlação produto-momento de Pearson (Field, 2009). Para calcular o valor do  $r$  de Pearson se tem a Eq. (7) abaixo (Field, 2009):

$$r = \frac{cov(x,y)}{s_x s_y} = \frac{\Sigma(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{(N-1)s_x s_y} \quad (7)$$

O valor a ser obtido com a utilização deste método varia entre 0, correlação nula, e 1, completamente relacionado (Field, 2009). Portanto, o resultado obtido representa o efeito da variável no resultado.

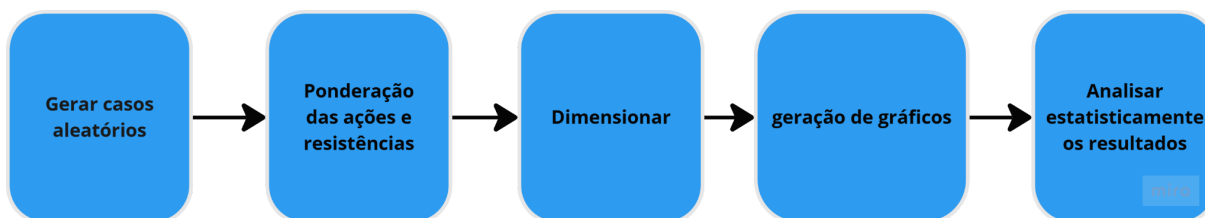
Para interpretar o tamanho do efeito, Jacob Cohen realizou uma classificação, estipulando  $r = 0,10$  como um efeito pequeno representando 1% da variância total (Cohen, 1988).  $r = 0,30$  como um efeito médio representando 9% da variância total (Cohen, 1988).  $r = 0,50$  como um efeito grande representando 25% da variância total (Cohen, 1988).

### 3 METODOLOGIA

O presente trabalho consistiu-se em uma análise comparativa, para lajes maciças de concreto armado simplesmente apoiadas, entre o dimensionamento em condições normais e em situação de incêndio.

A metodologia seguiu a sequência representada no fluxograma representado na figura 3.

**Figura 3** – Fluxograma do processo para análise.



Fonte: Autor (2025).

#### 3.1 Geração de Casos Aleatórios

Para este processo utilizou-se o FreeMat, software gratuito com funcionalidades semelhantes ao MATLAB voltado para computação numérica. Com o intuito de alcançar o objetivo proposto de análise de casos aleatórios que cubram, majoritariamente, casos usuais de uso de lajes maciças de concreto armado verificou-se os elementos que teriam maior impacto nos resultados.

Foi criada uma rotina de cálculo com variação de parâmetros construtivos, dentre os quais se incluem: comprimento dos vãos da laje em planta, resistência característica do concreto à compressão ( $f_{ck}$ ) a ser utilizado, cobrimento da armadura e as cargas atuantes na estrutura. Considerou-se a carga excepcional em função da resistência a diferentes tempos de fogo (ABNT, 2024).

Na escrita do código, definiram-se as variáveis que seriam utilizadas e estipulou-se os valores dos parâmetros constantes, sendo eles: carga variável de 2 kN/m<sup>2</sup>, largura da base de 1000 mm — considerando o dimensionamento para uma faixa de 1 metro de largura da laje — e temperatura inicial de 25 °C.

Estipularam-se os valores mínimos e máximos para os intervalos dos valores aleatórios, especificados no decorrer do trabalho. Em seguida, foi realizada uma simulação de Monte Carlo com distribuição uniforme, contemplando 100.000 casos, cada um contendo valores específicos para as cinco variáveis, garantindo confiabilidade do ponto de vista estatístico.

### 3.2 Dimensionamento

O método de cálculo utilizado foi baseado na Teoria da Elasticidade (Araújo, 2014a). O primeiro passo do processo de dimensionamento consistiu na realização de um pré-dimensionamento, estipulando-se uma espessura padrão de 100 mm para evitar casos em que fossem obtidas espessuras muito pequenas e sem relevância prática. Ressalta-se que não foi considerado o ELS de deformação, portanto o valor de 10 cm mostrou-se suficiente na maioria dos casos. Não contemplou-se a função corta fogo da laje neste estudo, para tal deve-se adotar os valores de espessura mínima exigidos pelo método tabular.

Definiu-se um  $f_{ck}$ , resistência característica do concreto à compressão, a ser considerado, variando de 20 MPa até 45 MPa. Sendo multiplicado pelo coeficiente  $k_{c,\theta}$  de acordo com a tabela 1, considerando agregados silicosos para fins de simplificação.

Para todos os casos considerou-se uma resistência característica ao escoamento do aço de 600 MPa, pois o diâmetro comercial utilizado, 5mm, é fabricado majoritariamente com aço CA-60. Minorou-se a resistência em função da temperatura de acordo com a tabela 2.

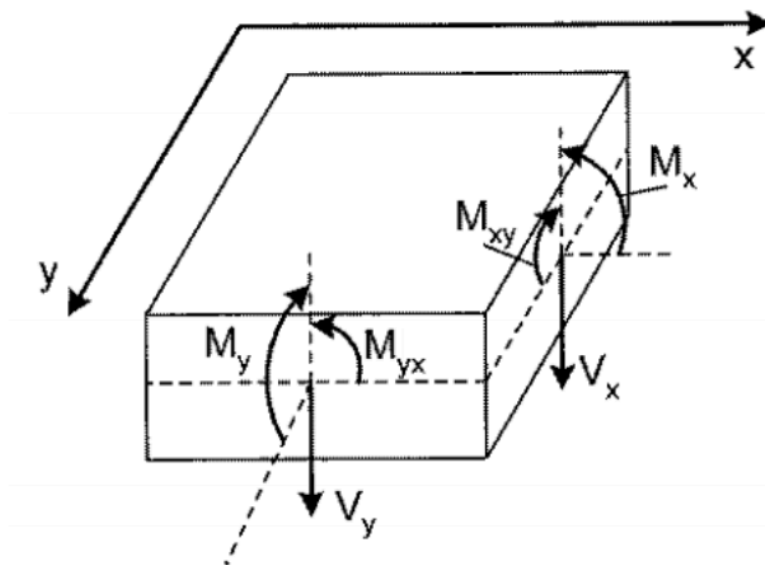
O cobrimento de concreto utilizado foi variável, de 20 a 40 milímetros. Levou-se em consideração o cobrimento mínimo dado em função a classe de agressividade do ambiente, de 20 mm, da NBR 6118 (ABNT, 2023) e a relação do cobrimento nominal ter espessura mínima igual a 10 milímetros mais o diâmetro do aço utilizado (ABNT, 2024).

Com o intuito de analisar a sobrecarga excepcional da exposição da estrutura ao fogo, considerou-se tempos requeridos de resistência ao fogo, TRRF, de 30, 60, 90 e 120 minutos. Avaliou-se qual dos métodos apresentados pela NBR 15200 (2024) — tabular ou simplificado — seria mais adequado para a análise.

As cargas atuantes na estrutura consideradas se deram pelo peso próprio, carga permanente, entre o intervalo de 3 a 6 kN/m<sup>2</sup>, e carga variável, estipuladas através da NBR 6120 (ABNT, 2019). Com a consideração do incêndio exigiu-se a consideração de coeficientes de ponderação das cargas  $j_g=1,2$ ,  $j_q=1,0$   $\psi_2=0,4$ , como indicado pela NBR 15200 (ABNT, 2024). O carregamento permanente foi majorado por  $j_g$  enquanto o carregamento variável foi minorado por  $j_q$  e por  $\psi_2$ .

Para o cálculo das armaduras é necessário obter os momentos em cada direção, sendo eles  $m_x$  e  $m_y$ , momentos fletores negativos nos apoios,  $M_x$  e  $M_y$ , momentos positivos no centro da laje, como ilustrado na figura 4 (Araújo, 2014a). Para calculá-los utilizou-se valores tabelados em função do tipo de carregamento, do tipo de laje e da razão entre o tamanho dos vãos, encontradas na bibliografia de José Milton de Araújo (Araújo, 2014a).

**Figura 4** - Momentos em um elemento de placa.



Fonte: Araújo (2014a).

Após o cálculo dos momentos atuantes, realizou-se a verificação do atendimento ao momento limite por meio da Eq. (8). O momento limite é valor máximo de momento fletor que garante a ductilidade da seção utilizando apenas a armadura inferior (Araújo, 2014a). Portanto, para a adoção de armadura simples, é necessário que o momento de projeto seja inferior ao momento limite.

$$M_{lim} = 0,25bd^2f_{cd} \quad (8)$$

Onde  $b$  é a base de 1 metro,  $d$  é a altura útil e  $f_{cd}$  é a resistência à compressão do concreto reduzida para o ELU.

A altura útil representa a distância do centro de gravidade da armadura tracionada até a borda comprimida da seção transversal (ABNT, 2023). Para calculá-la, utilizou-se a Eq. (9), onde  $\Phi$  é o diâmetro da armadura,  $h$  é a espessura e  $c$  é o cobrimento da armadura (ABNT, 2023).

$$d = h - (c + 1,5\Phi) \quad (9)$$

Nos casos que o momento de projeto superou o momento limite, adicionou-se 10 mm à espessura da laje a cada iteração até o atendimento da verificação.

Calculou-se as áreas de aço necessárias para resistir aos respectivos momentos de projetos através da Eq. (10), sendo  $M_d$  o momento de projeto,  $d$  o braço de alavanca e  $F_{yd}$  a resistência ao escoamento do aço (ABNT, 2023).

$$A_s = \frac{M_d}{(0,9d F_{yd})} \quad (10)$$

A Eq. (10) apresentou uma simplificação, pois a posição exata da linha neutra não foi calculada, adotando-se a aproximação do braço de alavanca como  $z = 0,9d$  (Araújo, 2014a).

Verificou-se a área mínima para as armaduras positivas no meio do vão por meio da Eq. (11). Nos casos em que a relação da Eq. (11) não foi atendida, a área de aço foi determinada pela área de aço mínima Eq. (12) (ABNT, 2023). Por se tratarem de lajes simplesmente apoiadas, não foi necessário verificar as armaduras negativas.

$$A_s/(bh) < 0,67\rho_{min} \quad (11)$$

$$A_s = \rho_{min} bh \quad (12)$$

Para padronização dos resultados, utilizaram-se apenas barras de aço com diâmetro comercial de 5 milímetros, visto que o uso de barras com pequenos diâmetros tende a gerar, para diferentes casos, maior dispersão nos valores de espaçamento, o que facilita a análise da sua variação. Portanto, variou-se apenas o espaçamento para atingir a área de aço, considerando o espaçamento máximo, neste caso, o menor entre 20 centímetros e o dobro da espessura (ABNT, 2023).

### 3.3 Análise Estatística

O modelo de cálculo utilizado, visando atender ao Estado Limite Último (ELU), aumentava a quantidade de aço necessária em diferentes situações para resistir aos esforços atuantes na estrutura. Portanto, o espaçamento das armaduras foi o principal parâmetro analisado.

A rotina de plotagem dos gráficos de dispersão incluiu o cálculo de linhas de tendência quadráticas, possibilitando a visualização da sensibilidade das variações em cada caso. Realizou-se, para cada parâmetro construtivo variado, uma correlação de Pearson possibilitando verificar a sensibilidade dos resultados em relação ao espaçamento da armadura. Calculou-se, por fim, o grau de dispersão da média através do cálculo da variância e do desvio padrão.

Comparou-se os resultados do dimensionamento para a combinação última normal, de acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2023), aos resultados do dimensionamento com a sobrecarga de incêndio, utilizando os mesmos casos aleatórios gerados. Consideraram-se como casos críticos todas as situações que não atenderam à verificação pelo método simplificado, permitindo, assim, identificar quais variáveis levaram à necessidade de redução do espaçamento em situação de incêndio.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O desenvolvimento do presente capítulo se deu pela apresentação e discussão dos resultados obtidos pela aplicação da metodologia descrita no capítulo 3. Foram analisados os resultados do dimensionamento de lajes maciças simplesmente apoiadas nos quatro bordos em condições normais e em situação de incêndio. Em seguida comparada aos resultados do dimensionamento de acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2023) para combinação última normal em temperatura ambiente.

### 4.1 Escolha do Método de Verificação

O método tabular mostrou-se inadequado para este estudo, pois com base nos dados da Tabela 3, referentes à verificação tabular para lajes simplesmente apoiadas, o cobrimento mínimo exigido de 20 mm pela classe de agressividade ambiental, conforme a NBR 6118 (ABNT, 2023), já seria suficiente para garantir 90 minutos de exposição ao fogo. Portanto, optou-se pelo método simplificado para a verificação.

### 4.2 Aplicação do Método Simplificado no Dimensionamento

Utilizando o programa FreeMat, foi realizado o processo de dimensionamento para uma laje apoiada nos quatro cantos, seguindo a NBR 6118. Foram feitas adaptações, descritas a seguir, para a implementação do método simplificado.

Incluiu-se o cálculo da temperatura dependente do incêndio, obtido por meio da Eq. (1) de incêndio padrão (ABNT, 2024), gerando o tempo em minutos dentro do intervalo requerido de resistência ao fogo, de 30 a 120 minutos (ABNT, 2024).

Com a temperatura calculada para cada caso, verificou-se a temperatura nas armaduras positivas, dada em função da Eq. (2), e interpolou-se o fator de minoração da resistência do aço, conforme a Tabela 1. O mesmo processo foi

repetido para o concreto, utilizando a Tabela 2. Realizou-se a combinação das ações excepcionais de acordo com a Eq (4).

#### 4.3 Análise dos Dados

Estes resultados foram obtidos com simulação de Monte Carlo, uma técnica que utiliza amostragem aleatória para analisar estatisticamente as variabilidades e incertezas, com uma amostra de 100.000 pontos. Dessa forma, os resultados obtidos são estatisticamente confiáveis e as conclusões apresentadas são relevantes para o escopo dos casos testados.

As variáveis consideradas neste estudo foram distribuídas nos seguintes intervalos: cobertura variando de 20 a 40 mm, carga permanente entre 3 e 6 kN/m<sup>2</sup>, resistência característica do concreto (fck) de 20 a 45 MPa e as dimensões dos vãos em planta variando de 2 a 7 metros em ambas as direções, representados na tabela 4. Para o dimensionamento utilizou-se o aço CA-60 de 5mm de diâmetro.

**Tabela 4** - Tabela do intervalo de valores que as variáveis aleatórias foram geradas

Variável	Abreviação	Limite inferior	Limite superior	Unidade
Cobertura	C	20	40	mm
Resistência característica do concreto à compressão	fck	20	45	MPa
Carga permanente	Fg	3	6	kN/m <sup>2</sup>
Vão em x	Lx	2	7	m
Vão em y	Ly	2	7	m
Tempo Requerido de Resistência ao Fogo	TRRF	30	120	min

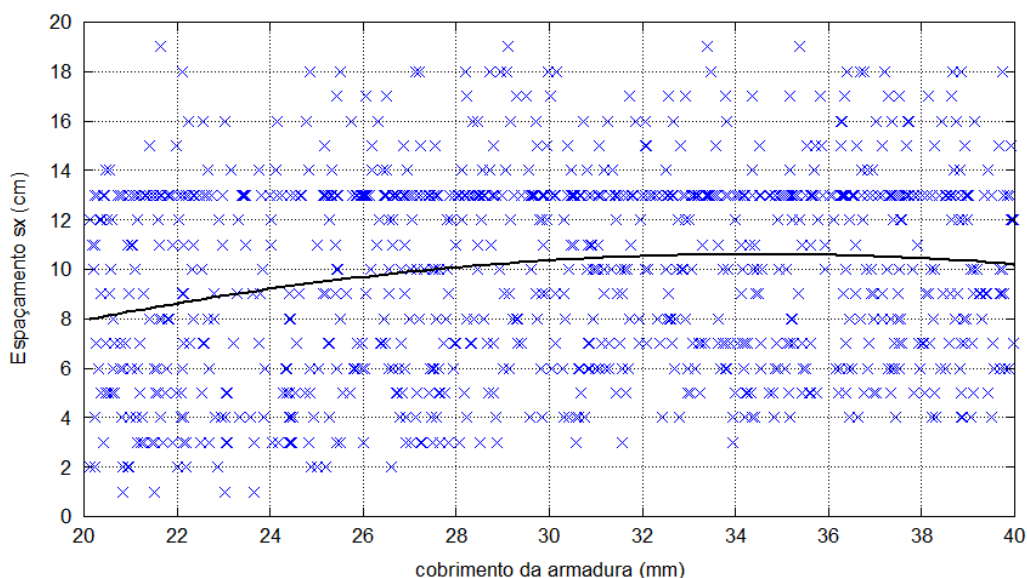
Fonte: Autor (2025).

Utilizando os valores gerados, aplicou-se um script para realizar o dimensionamento. Ao salvar os resultados, foi possível representá-los graficamente.

Para fins de compreensão do comportamento e da influência dos parâmetros construtivos, observou-se os espaçamentos resultantes correspondentes a cada valor das variáveis aleatórias.

Utilizando o espaçamento como base, representado no eixo y, buscou-se verificar a influência do cobrimento por meio da figura 5, na qual foi traçada uma linha de tendência quadrática a fim de analisar o comportamento dos resultados.

**Figura 5** - Gráfico dos resultados de espaçamento(sx) para os valores de cobrimento(c) gerados.

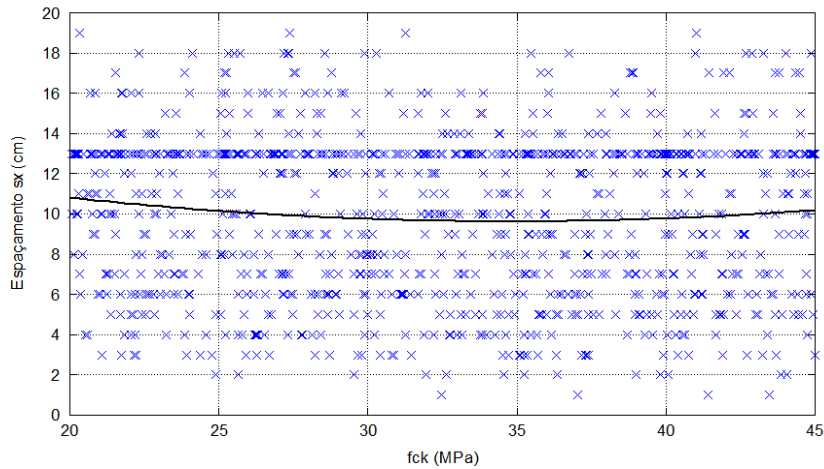


Fonte: Autor (2025).

Para os valores de cobrimento próximos ao mínimo estabelecido, o espaçamento médio entre armaduras foi de aproximadamente 8 centímetros. Com o aumento do cobrimento, observa-se um discreto acréscimo na média dos espaçamentos.

Realizou-se uma correlação de Pearson com os dados do gráfico, resultando em  $r$  igual a 0,164. Com base na classificação de Cohen (1988), o cobrimento exerce um efeito pequeno, representando 2,7% da influência do resultado.

Representando a resistência característica do concreto à compressão no eixo das abscissas, verificou-se a variação do espaçamento, no eixo das ordenadas, através de uma linha de tendência quadrática (figura 6).

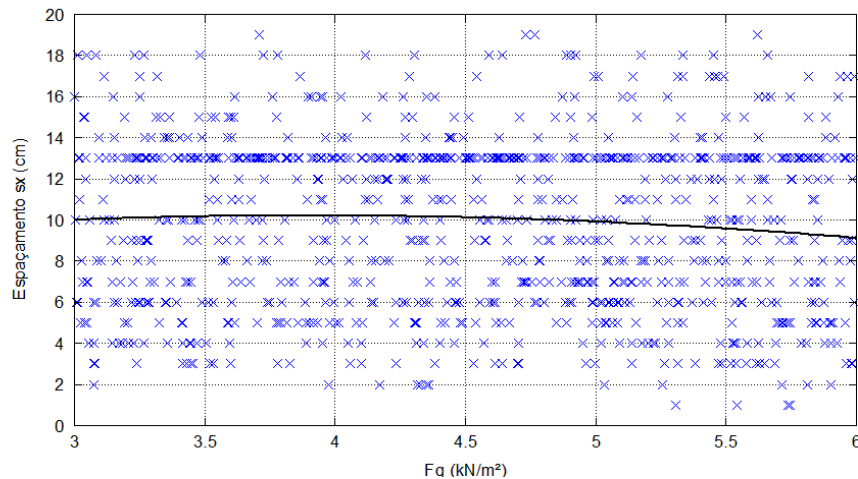
**Figura 6** - Gráfico dos resultados de espaçamento( $s_x$ ) para os valores de resistência( $f_{ck}$ ) gerados.

Fonte: Autor (2025).

Ao comparar o valor final e inicial da curva de tendência, observa-se pouca variação, possuindo aproximadamente o mesmo valor de espaçamento.

A correlação de Pearson, referente ao espaçamento e ao  $f_{ck}$ , foi igual a  $r$  igual a  $-0,005$ . Avaliando pela classificação de Cohen (1988), a variável possui um efeito ínfimo, representando  $0,000025\%$  de influência no resultado. Portanto, a correlação de Pearson indica que o  $f_{ck}$  não possui impacto no resultado.

A figura 7 representa o carregamento permanente, no eixo das abscissas, para os valores do espaçamento, no eixo das ordenadas, utilizando uma linha de tendência quadrática para melhor visualização.

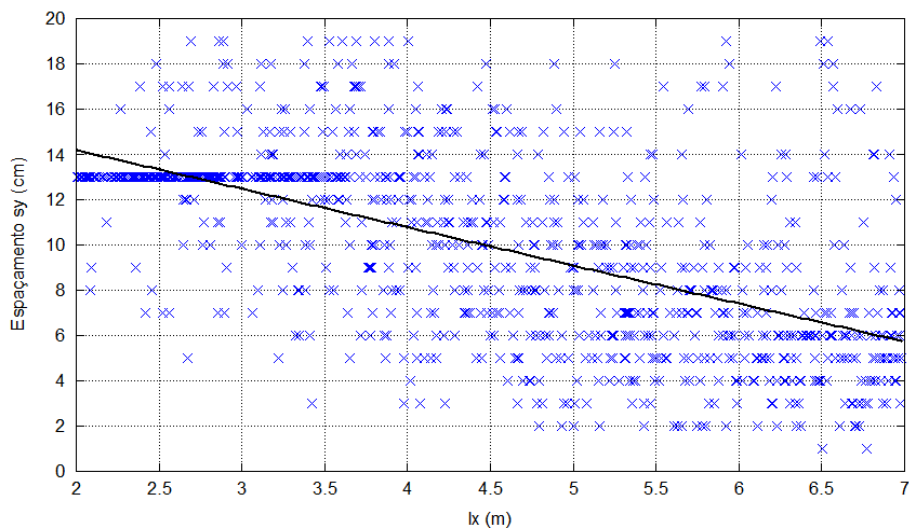
**Figura 7** - Gráfico dos resultados de espaçamento( $s_x$ ) para os valores de carregamento( $F_g$ ) gerados.

Fonte: Autor (2025).

O carregamento utilizado gerou em média um espaçamento de aproximadamente 10 cm. A correlação de Pearson resultou em  $r$  igual a  $-0.05$ . Com base na classificação de Cohen (1988), tem-se uma sensibilidade inferior ao efeito pequeno, com menos de 0,0025% de influência no resultado.

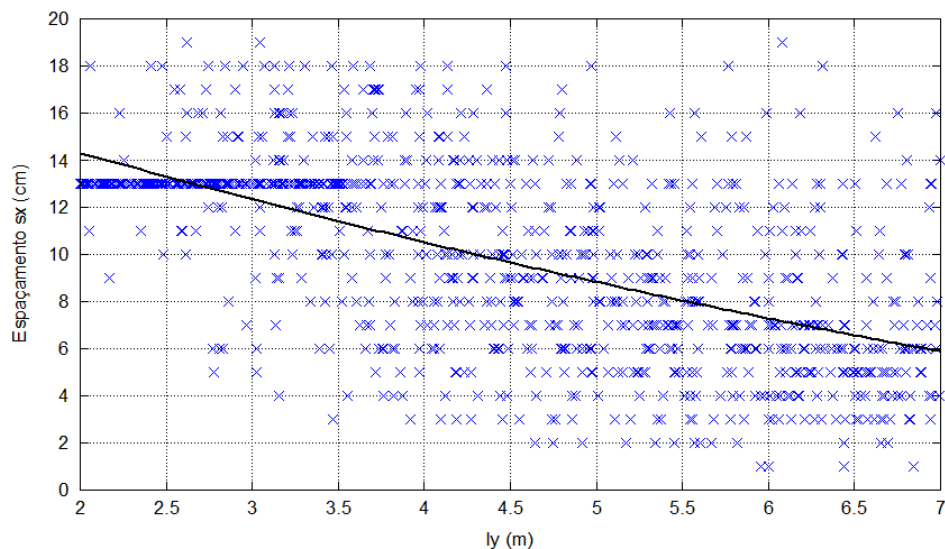
Ao analisar a influência do vão no espaçamento plotou-se gráficos referentes à dimensão em planta do eixo  $x$  na figura 8 e do eixo  $y$  na figura 9.

**Figura 8** - Gráfico dos resultados de espaçamento( $s_y$ ) perante a dimensão do vão no eixo  $x$  ( $l_x$ ).



Fonte: Autor (2025).

**Figura 9** - Gráfico dos resultados de espaçamento( $s_x$ ) perante a dimensão do vão no eixo  $y$  ( $l_y$ ).



Fonte: Autor (2025).

Nota-se que o vão tem grande influência perante a utilização de armadura, pelo fato de ter influência direta no aumento do momento fletor, como esperado.

Os valores de variância, desvio padrão e da correlação de Pearson foram apresentados na tabela 5 para fins de comparação.

**Tabela 5** - Tabela resumo de valores de variância, desvio padrão e correlação de Pearson

Variável	Abreviação	Variância	Desvio Padrão	Correlação de Pearson
Espaçamento	S	15,77	3,97	1
Cobrimento	C	33,19	5,76	0,164
Resistência característica do concreto à compressão	fck	51,14	7,15	-0,005
Carga permanente	Fg	0,739	0,859	-0,05
Vão em x	Lx	2,09	1,44	-0,499
Vão em y	Ly	2,09	1,44	-0,507
Tempo Requerido de Resistência ao Fogo	TRRF	1429,10	37,80	-0,449

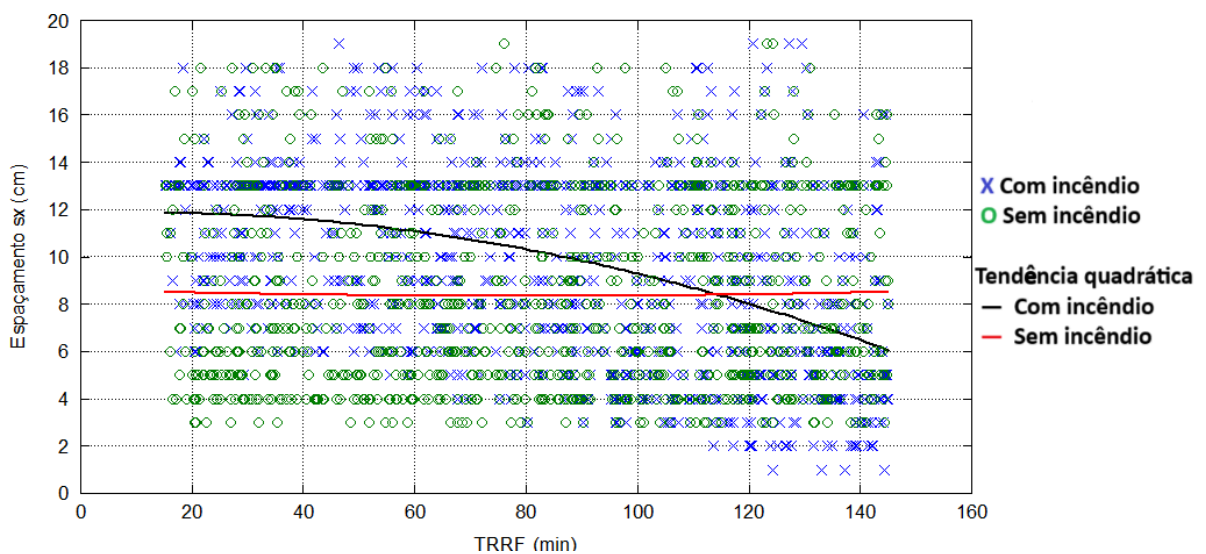
Fonte: Autor (2025).

Tem-se o vão como variável que mais impacta a diminuição do espaçamento, com equivalentes 25% de contribuição, logo após o tempo requerido de resistência ao fogo de 20% de contribuição. Observa-se que o cobrimento contribuiu para a mitigação da ação do fogo, todavia, pela grande variabilidade dos dados, não se teve uma clara correlação. Para melhores resultados se sugere o uso de um método de dimensionamento mais preciso.

Para a figura 10 analisou-se os valores de espaçamento para cada TRRF, tanto para a combinação excepcional utilizando o método simplificado (azul), como com uma combinação última normal, sem minoração da resistência dos materiais (verde).

Os valores do TRRF por norma começam a partir de 30 minutos de resistência. Quando analisado de maneira gráfica, caso fosse utilizado o intervalo de 30 a 120 minutos teria-se uma incerteza nos extremos do gráfico, para resolver tal problema se estendeu meio intervalo, 15 minutos, em ambos extremos, para que assim os valores de 30 e 120 minutos fossem representativos.

**Figura 10** - Gráfico dos resultados de espaçamento( $s_x$ ) para os valores do tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF) com e sem utilização do método simplificado.



Fonte: Autor (2025).

Ao analisar os valores do método simplificado, aparenta existir uma correlação entre o tempo requerido de resistência ao fogo e o espaçamento das armaduras, diminuindo o espaçamento com o aumento da solicitação de incêndio.

Nota-se que, para o intervalo de valores utilizados, a linha de tendência vermelha, referente aos valores da combinação normal, se manteve constante, com um espaçamento de 8,5 cm, enquanto para o método simplificado obteve-se uma média de espaçamento igual a 9,5 cm. O comportamento dos valores constantes já era esperado, uma vez que, quando o incêndio não é considerado, o TRRF não influencia a taxa de armadura.

Comparando a combinação normal à combinação excepcional com minoração da resistência do concreto e do aço analisadas, obteve-se valores significativamente maiores de espaçamento para baixos TRRF. Portanto, confirma-se o caráter de verificação do método simplificado. Dessa maneira, para os

casos apresentados, em média o dimensionamento sem a consideração do incêndio é suficiente para atender ao TRRF.

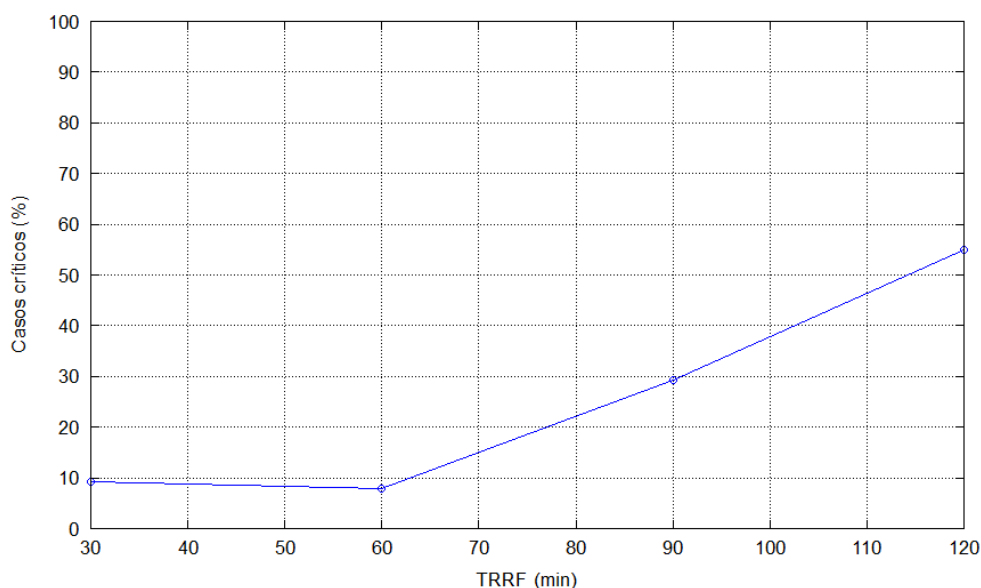
O ponto de interseção entre as duas linhas de tendência representa o momento em que, em média, o espaçamento considerando o incêndio começa a exigir mais armadura.

Os casos que não satisfizeram a verificação do método simplificado foram classificados como casos críticos. Ao analisar tais casos, foi possível verificar variáveis responsáveis pela necessidade de redução do espaçamento em condições de incêndio.

Para quantificar os casos críticos, realizou-se uma filtragem dos dados, possibilitando a obtenção da porcentagem, representada na figura 11, de casos que não atenderam a cada TRRF.

Na figura 11 observa-se que para 30 e 60 minutos de exposição ao incêndio, menos de 10% das lajes geradas não passaram na verificação. Isso significa que, ao considerar o incêndio no dimensionamento, para esses TRRFs (entre 30 e 60 minutos), apenas cerca de 10% das situações analisadas resultaram em aumento da quantidade de armadura.

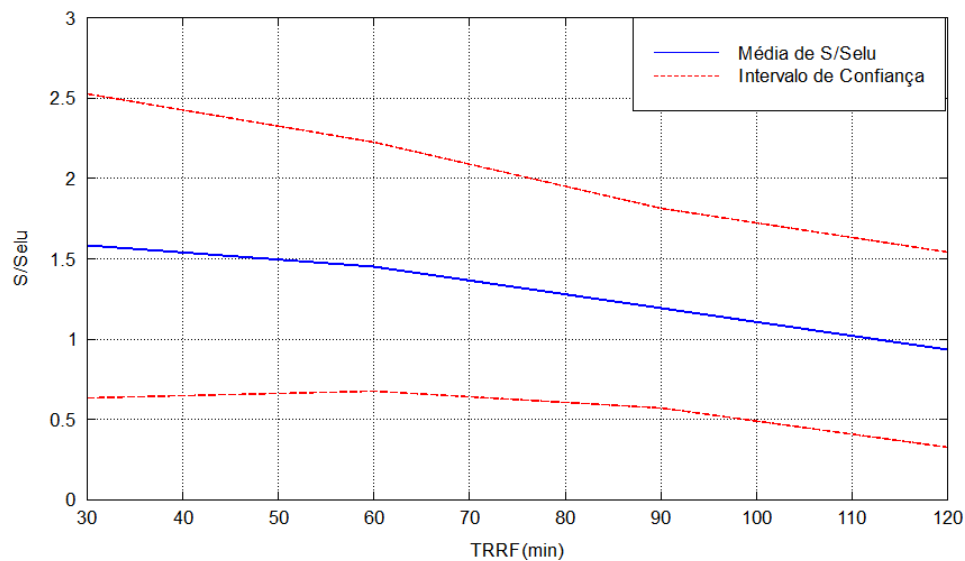
**Figura 11** - Gráfico da porcentagem de casos críticos em função do TRRF.



Fonte: Autor (2025).

Em cada caso analisado, determinou-se a razão entre os valores de espaçamento obtidos pelos dois métodos de dimensionamento, considerando-se todos os espaçamentos resultantes. Para cada TRRF, foram calculadas a média e o desvio padrão dessa razão, possibilitando a construção do intervalo de confiança. A Figura 12 apresenta, em azul, a média da razão entre os dimensionamentos, enquanto as linhas tracejadas indicam os limites do intervalo de confiança de 95%. Convém destacar que valores dessa razão superiores a 1 indicam que a taxa de armadura obtida sem considerar o incêndio foi maior que aquela determinada para o ELU em situação de incêndio, evidenciando que, nesses casos, a consideração do incêndio não alteraria o dimensionamento.

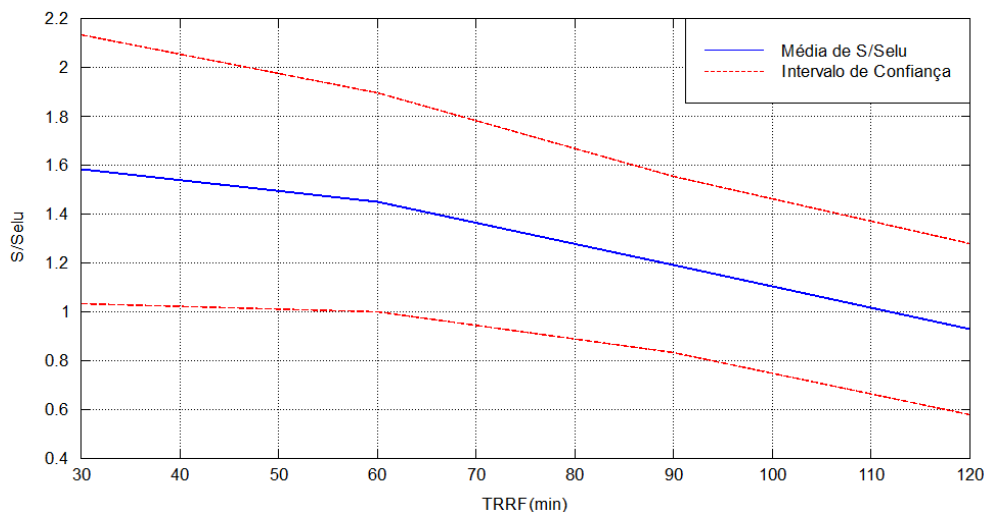
**Figura 12** - Gráfico da média das razões entre espaçamento da combinação normal pela combinação excepcional para cada TRRF com um intervalo de confiança de 95%.



Fonte: Autor (2025).

Verificou-se que, para esse intervalo de confiança, estão incluídos valores críticos, inferiores a um, para todos os tempos de TRRF. Realizou-se interações para verificar qual valor de  $z$  resultaria, para tempos de até 60 minutos, em apenas valores superiores a um. Obteve-se o resultado de  $z = 1,15$  aproximando-se do intervalo de confiança de 75% (figura 13).

**Figura 13** - Gráfico da média das razões entre espaçamento da combinação normal pela combinação excepcional para cada TRRF com um intervalo de confiança de 75%.

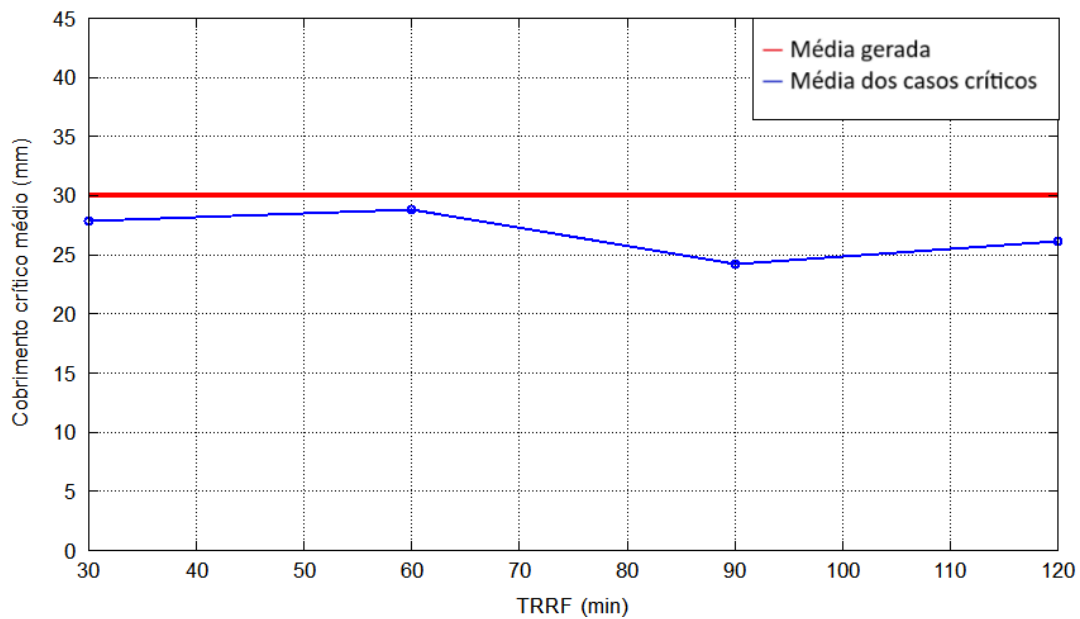


Fonte: Autor (2025).

A identificação dos casos críticos possibilita verificar novamente a influência das variáveis. Ao averiguar o distanciamento entre a média dos valores críticos e a média gerada uniformemente pela simulação de Monte Carlo, foi possível inferir que, quanto maior essa diferença, mais significativa é a relação, caso contrário, o valor tende a ser indiferente.

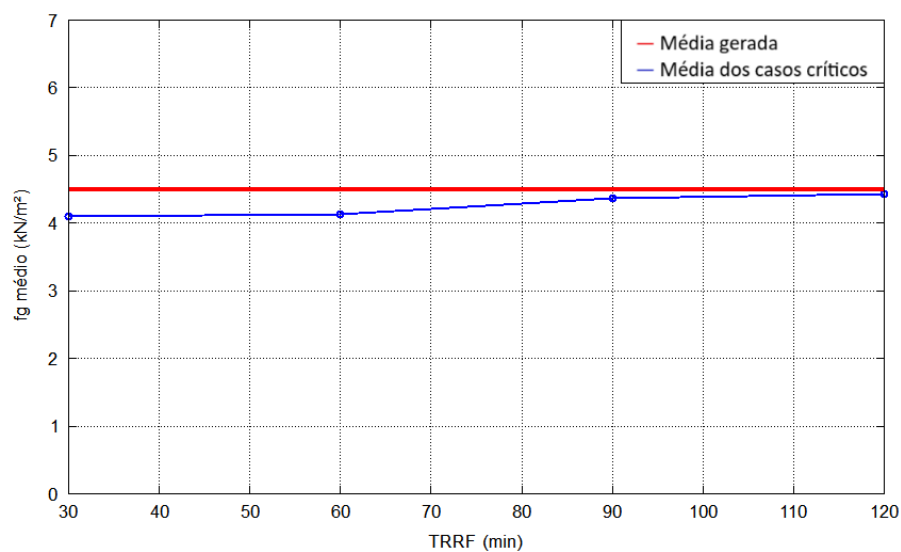
Calculou-se a média para cada tempo de exposição ao incêndio dos valores filtrados de cobrimento representados na figura 14.

Observa-se que para 30 e 60 minutos o cobrimento crítico médio se aproxima da média gerada de 30 mm. Logo, considerando o tipo de laje analisada, para baixas temperaturas o cobrimento se faz pouco influente no resultado. Todavia para tempos elevados de incêndio (TRRF de 90 e 120 minutos) as lajes críticas são aquelas com menores valores de cobrimento (figura 14).

**Figura 14** - Média dos valores de cobrimentos dos casos críticos para cada TRRF.

Fonte: Autor (2025).

A carga permanente e a resistência característica do concreto à compressão, para os casos críticos, foram observadas através das figuras 15 e 16, respectivamente.

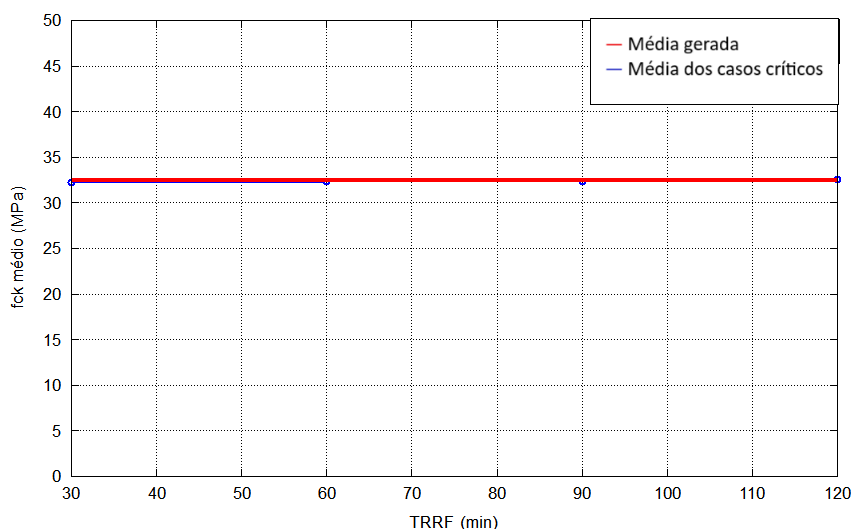
**Figura 15** - Média da carga permanente dos casos críticos para cada TRRF.

Fonte: Autor (2025).

Notou-se, ao analisar a Figura 15, uma leve tendência de aumento na média dos valores da carga permanente com o acréscimo da temperatura. Assim, os resultados sugerem que a carga permanente apresenta uma pequena influência em baixos tempos de exposição ao incêndio.

A figura 16 mostra que com a variação do TRRF os valores de  $f_{ck}$  não se distanciam da média gerada. Logo o  $f_{ck}$  se mostra indiferente no uso do método simplificado para análise do estado limite último das lajes analisadas dentro dos parâmetros gerados.

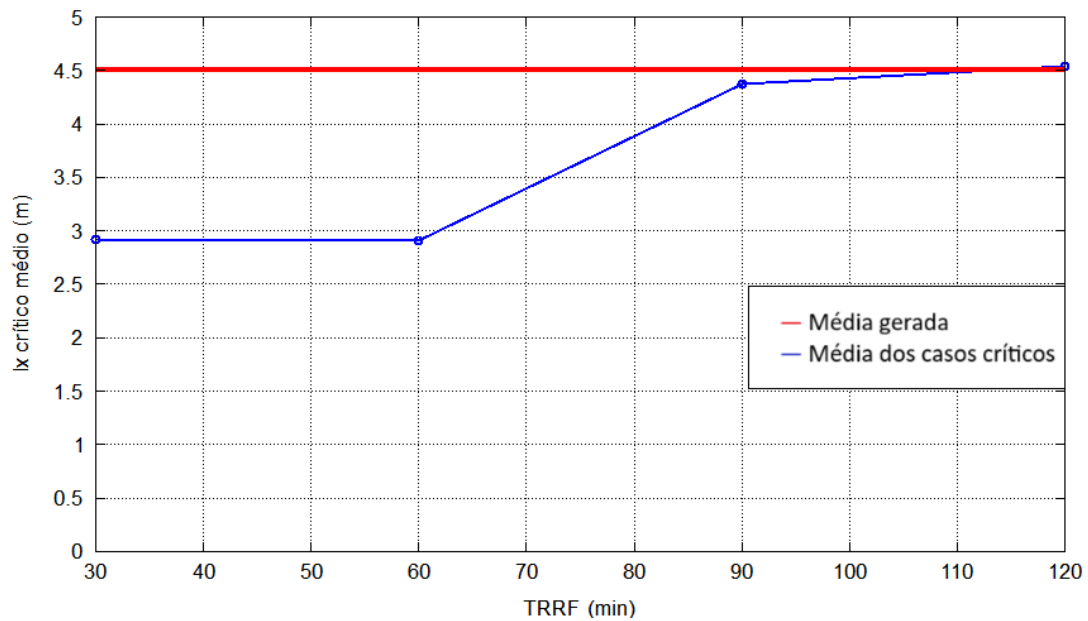
**Figura 16** - Média da resistência característica do concreto à compressão dos casos críticos para cada TRRF.



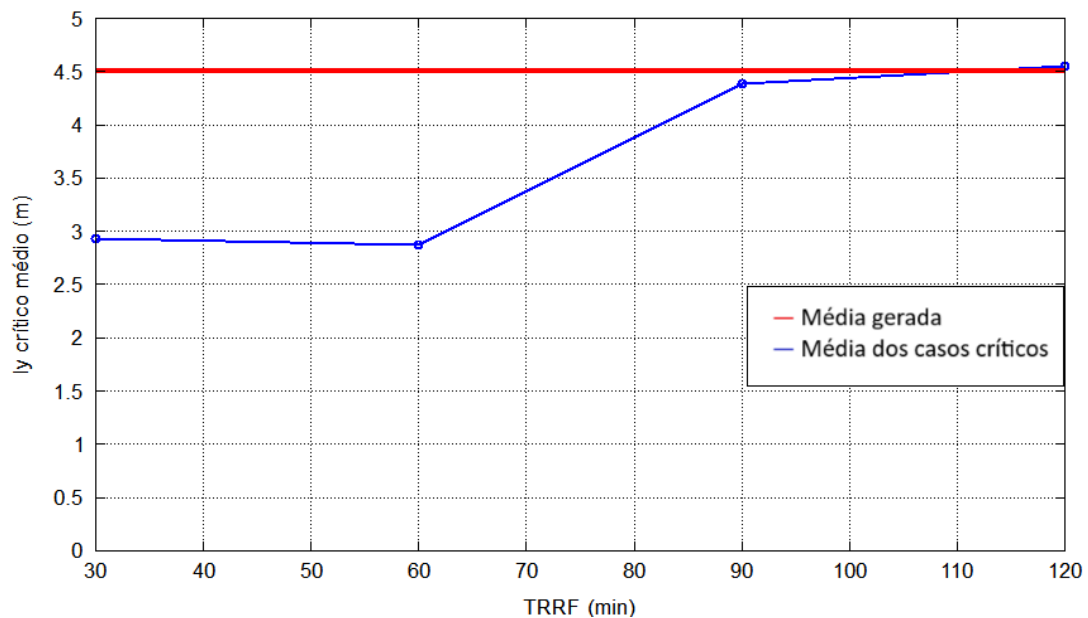
Fonte: Autor (2025).

Realizou-se o mesmo procedimento da da figura 14 para análise do vão nas duas direções da laje (figura 17) (figura 18).

Para 30 e 60 minutos, em ambas as direções, observa-se uma média de aproximadamente 3,6 que é relativamente baixa perante os valores gerados (figura 17) (figura 18). Há, também, uma ascendência dos valores do vão com o aumento do TRRF, aproximando-se do valor médio gerado ao chegar com 120 minutos de exigência (figura 17) (figura 18). Esses resultados indicam que, para TRRF de 30 e 60 minutos, as lajes com menores vãos foram mais influenciadas pelo dimensionamento em situação de incêndio. Para TRRF de 90 e 120 minutos, por outro lado, o vão não parece ter sido um fator determinante.

**Figura 17** - Média do vão na direção x dos casos críticos para cada TRRF.

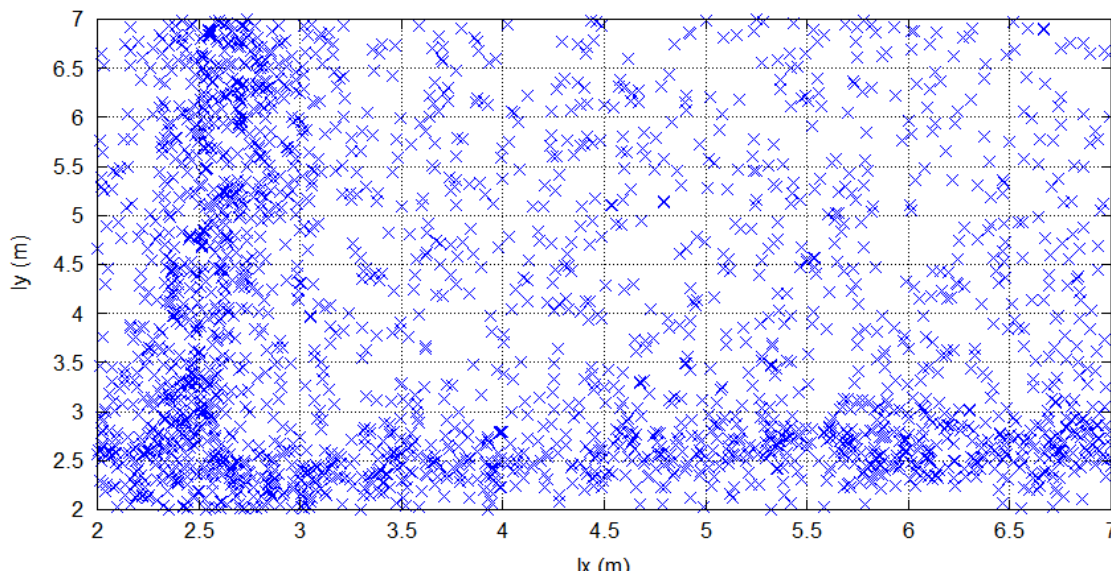
Fonte: Autor (2025).

**Figura 18** - Média do vão na direção y dos casos críticos para cada TRRF.

Fonte: Autor (2025).

Os resultados indicam que, para os parâmetros de variáveis gerados, os casos críticos são compostos por lajes com pequenas dimensões. Representou-se, com intuito de verificar esse fato, os valores de  $l_x$  por  $l_y$  críticos na figura 19.

**Figura 19** - Gráfico dos valores de  $l_x$  e  $l_y$  para cada caso crítico.

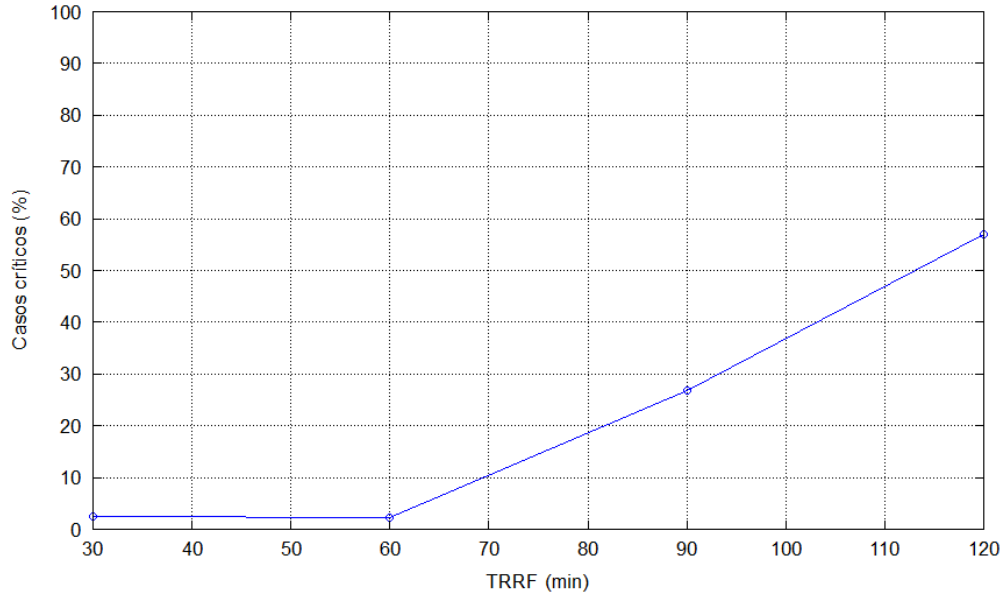


Fonte: Autor (2025).

Observa-se uma quantidade densa de resultados entre dois e três metros, verificando visualmente uma possível correlação das dimensões dos vãos com os casos críticos.

Para verificar a possibilidade de que a dimensão do vão estaria levando os casos a se tornarem críticos, calculou-se a porcentagem dessa ocorrência para valores de vãos a partir de 2,5 até ao invés de 2 metros, mantendo o vão máximo igual a 7 metros (figura 20). Plotando-se os resultados na figura 20, percebe-se, ao se comparar com a figura 11, uma redução da porcentagem para TRRFs inferiores a 60 minutos. Obtendo uma porcentagem de casos críticos inferiores a 2,5% para TRRFs de 30 e 60 minutos.

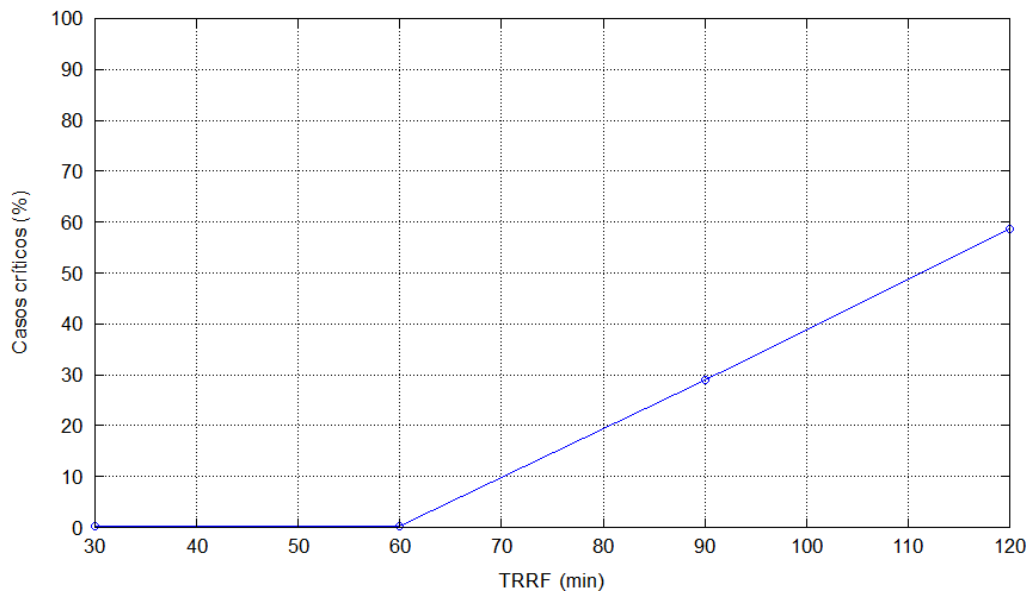
**Figura 20** - Gráfico da porcentagem de casos críticos em função do TRRF considerando  $l_x$  e  $l_y$  superiores a 2,5 metros.



Fonte: Autor (2025).

Realizou-se uma nova limitação no vão mínimo para 3 metros e verificou-se a porcentagem de casos críticos (figura 21).

**Figura 21** - Gráfico da porcentagem de casos críticos em função do TRRF considerando  $l_x$  e  $l_y$  superiores a 3 metros.



Fonte: Autor (2025).

Com os valores gerados para a figura 21 com a limitação do vão, reparou-se que tanto para 30 como para 60 minutos não há ocorrência de casos críticos. Portanto, os resultados indicam que não haveria necessidade de se realizar a verificação de lajes maciças de concreto simplesmente apoiadas, desde que sejam utilizados parâmetros dentro dos intervalos aplicados.

As razões pelas quais lajes com vãos inferiores a 3 metros não atendem ao método simplificado não foram esclarecidas neste estudo. No entanto, tal limitação pode servir como ponto de partida para investigações futuras.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo aplicou, para lajes maciças de concreto armado simplesmente apoiadas, um método simplificado de análise a estruturas de concreto em situação de incêndio. Para isso, seguiu-se o modelo de incêndio padrão apresentado na bibliografia de Araújo (2014a) para calcular a temperatura tanto na superfície da laje, quanto na armadura, após diferentes tempos de exposição ao fogo.

Alcançou-se o objetivo de criar rotinas de cálculo para dimensionar lajes à temperatura ambiente, calculando a carga através de uma combinação de ações normal. Em seguida, realizou-se o dimensionamento aplicando o método simplificado.

Para examinar o impacto de variáveis construtivas — comprimento dos vãos, resistência característica do concreto à compressão ( $f_{ck}$ ), cobrimento da armadura e carga permanente — na resistência a incêndios com diferentes durações, foram gerados 100.000 casos com uma simulação de Monte Carlo de distribuição uniforme, garantindo relevância estatística para o escopo de casos testados

Os resultados obtidos são válidos apenas para o tipo de laje analisada e com parâmetros construtivos dentro dos intervalos definidos.

O Tempo Requerido de Resistência ao Fogo (TRRF) e o vão exerceram influência significativa no aumento da solicitação da laje. O cobrimento,  $f_{ck}$  e a carga permanente estipulados não apresentaram uma correlação significativa, devido à alta variabilidade dos dados gerados. O efeito do cobrimento tornou-se mais relevante à medida que aumentou o tempo requerido de resistência ao fogo. Para melhores resultados, recomenda-se o uso de um método de cálculo mais preciso de dimensionamento.

A utilização do método simplificado resultou em valores de espaçamento acima daqueles referentes à combinação normal. Para os tempos de 30 e 60 minutos, 10% dos casos não atenderam à verificação do método simplificado.

Para tempos de incêndio inferiores a 60 minutos, o intervalo de confiança de 75% indica que o espaçamento, sem considerar o incêndio, é consistentemente menor do que aquele obtido com sua consideração.

Ao dimensionar lajes maciças de concreto armado simplesmente apoiadas, com parâmetros dentro dos valores estabelecidos e vãos superiores a 3 metros, os resultados indicaram a possibilidade de se desconsiderar a verificação da resistência ao incêndio para TRRFs de 30 e 60 minutos.

Ressalta-se que as conclusões apresentadas são preliminares e baseiam-se nos parâmetros e limitações definidos neste estudo.

Dessa forma, o trabalho evidencia a necessidade por estudos aprofundados na NBR 15200, a fim de trazer mais um parâmetro construtivo relevante para a segurança dos edifícios.

## REFERÊNCIAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto - procedimento. Rio de Janeiro, 2023.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6120**: Cargas para o cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro, 2019.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 8681**: Ações e segurança nas estruturas - Procedimento. Rio de Janeiro, 2003.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 14432**: Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos das edificações. Rio de Janeiro, 2001.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15200**: Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio. Rio de Janeiro, 2024.

ARAÚJO, J. M. Curso de Concreto Armado. v. 2. 4. ed. Rio Grande do Sul: Dunas, 2014a.

ARAÚJO, J. M. Curso de Concreto Armado. v. 4. 4. ed. Rio Grande do Sul: Dunas, 2014b.

**ASTM E119**. Standard Test Methods for Fire Tests of Building Construction and Materials. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2020.

BRITTO, C. **Dimensionamento de estruturas de concreto armado em situação de incêndio: comparação de requisitos técnicos entre a abnt nbr 15200:2012 e a aci/tms-216.1m-14**. 2018, Trabalhos de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/189165>. Acesso em: 7 jun. 2025.

COHEN, J. **Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences**. 2. ed. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates, 1988.

Costa, C. N.; Figueiredo, A. D.; Silva, V. P. (2002), **Aspectos tecnológicos dos materiais de concreto em altas temperaturas**. In: Seminário Internacional NUTAU 2002. Sustentabilidade, Arquitetura e Desenho Urbano. São Paulo: NUTAU/FUPAM/FAUUSP. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/001269181>. Acesso em: 17 jun. 2025.

FANTON, A. R. **Análise numérica do comportamento termomecânico de lajes de concreto armado expostas ao fogo**. 2019, Dissertação (Engenharia Civil) — Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2019. Disponível em: <https://hdl.handle.net/20.500.12733/1637991>. Acesso em: 7 abr. 2025.

FIELD, A. **Descobrendo a estatística usando o SPSS**. 2. ed. Porto Alegre: Grupo A – Bookman, 2009.

---

SANTIAGO FILHO, H. A. **Estudo do comportamento de lajes de concreto armado em situação de incêndio**. 2018, Dissertação (Engenharia Civil) — Universidade Federal de Pernambuco, Pernambuco, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/30445>. Acesso em: 10 abr. 2025.

HAGER, I. **Behavior of cement concrete at high temperature**. Bulletin of the Polish Academy of Sciences. Technical Sciences, 2013.

RAMACHANDRAN, G. **Fire safety management and risk assessment**. Fire Safety Journal, 1999.

UNITED NATIONS OFFICE FOR DISASTER RISK REDUCTION (UNDRR), **Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015-2030**, 2015.

USP – ESCOLA POLITÉCNICA **Legislação brasileira surgiu após incêndios de grandes proporções em SP**. Disponível em: <https://www.poli.usp.br/noticias/426-legislacao-brasileira-surgiu-apos-incendios-de-grandes-proporcoes-em-sp.html>. Acesso em: 6 set. 2024.

ZAGO, C.; LOPES, A. **Análise comparativa dos métodos de dimensionamento de lajes alveolares em situação de incêndio**. 2016, Dissertação (Engenharia Civil) — Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2016. Disponível em: <https://repositorio.unicamp.br/acervo/detalhe/975649>. Acesso em: 7 abr. 2025.